

考虑用户需求的电动汽车虚拟同步机辅助调频控制策略

苏 粟¹,李家浩¹,李泽宁¹,王业庭²,夏 冬³,王世丹⁴

(1. 北京交通大学 国家能源主动配电网技术研发中心,北京 100044;2. 国网新源控股有限公司,北京 100761;
3. 国网天津市电力公司经济技术研究院,天津 276000;4. 国网北京市电力公司海淀供电公司,北京 100000)

摘要:大量电动汽车(EV)入网可为电网提供辅助调频服务。针对车网互动(V2G)造成的惯量、阻尼缺失的问题,采用虚拟同步机技术,使得EV具有与同步发电机类似的惯性阻尼特性和频率调节特性。针对EV辅助调频问题,提出考虑用户充电需求的EV智能充放电控制策略。首先,提出调频参与度因子,根据期望荷电状态以及用户的计划充电时间自适应确定一次调频系数,进而得到一次调频功率;然后,充分考虑车主需求,设计T-S型模糊控制器,根据电网频率偏差及调频参与度因子得到二次调频功率,实现EV的智能充放电;最后,在不同电池初始状态以及用户需求情况下进行仿真验证。仿真结果表明,所提控制策略可以根据电网频率波动情况以及用户充电需求程度智能控制EV进行充放电,在满足用户充电需求的情况下参与电网辅助调频服务,减小了电网频率波动,提高了电力系统的稳定性。

关键词:电动汽车;虚拟同步机;辅助调频;用户需求;控制策略;V2G

中图分类号:U 469.72;TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109008

0 引言

随着能源危机的加剧,作为新能源汽车代表的电动汽车EV(Electric Vehicle),已被公认为21世纪汽车工业发展的主要方向,为此世界各国高度重视EV的开发和推广^[1]。我国“十二五”期间规划加大对EV等新能源领域的投入和支持力度,为国内EV市场的启动和加速发展提供了强大的动力^[2]。EV的快速发展将对电网产生巨大的影响,从而促进了车网互动V2G(Vehicle-to-Grid)技术的研究^[3]。EV不仅可以作为负荷,也可以作为分布式储能为电网提供辅助服务^[4]。其中,EV向电网提供的辅助调频服务被认为是V2G最有价值和前景的研究方向^[5],并已逐渐成为研究热点之一^[6]。

由于传统的V2G技术“只管自身放电,不顾及电网”,当大量EV入网后会造成电网惯量以及阻尼缺失的问题。虚拟同步机VSM(Virtual Synchronous Machine)技术作为解决这一问题的有效手段受到了国内外学者的广泛关注^[7]。VSM有虚拟同步整流器VSR(Virtual Synchronous Rectifier)与虚拟同步发电机VSG(Virtual Synchronous Generator)2种工作模式,其主要工作原理为模拟同步机组的电磁、阻尼特性,使变流器的运行特性更接近于同步机^[8]。将虚拟同步发电技术应用于V2G参与调频的过程中,可以有效解决大量EV入网时造成的惯量、阻尼缺失问题,提高电力系统的稳定性。

目前,关于EV参与调频的研究主要包括2个方面:①对EV与可再生能源进行协同配合调频,如文献[9]提出一种时滞环境下应用EV和电热泵协同参与系统负荷频率控制的调控策略;文献[10]研究了EV接入高风电渗透率的丹麦电网参与调频的方法;②对EV自主参与频率调整的方法进行研究,如文献[11]提出了EV参与一次调频的自适应下垂控制模型,并详细仿真了EV参与一次调频对电网的影响;文献[12]提出了一种计及EV辅助调频的负荷频率控制联合优化方法,有效地改善了负荷频率控制的稳态响应速度,优化了系统的调频性能;文献[13]针对家用EV用户的差异性,在出行链理论的基础上提出了一种计及停车时长充裕度以及分时电价的充电需求分布分析方法,但是没有考虑EV参与调频辅助服务;文献[14]基于VSM提出了一种电网友好的EV快充解决方案,可以在减小对电网影响的同时对EV进行快速充放电;文献[15]设计了基于VSM的辅助调频控制算法,通过计算“功率参考值修正量”改变EV的充放电功率参考值,使得EV参与微电网的一次、二次调频;文献[16]将VSM技术应用于V2G中,并基于电池的荷电状态SOC(State of Charge)以及电网频率波动,设计了模糊控制器用于解决VSM的智能充放电问题,但并未考虑用户充电需求;文献[17]提出了根据已入网时长内EV的平均充电功率 P_{av} 反映用户充电需求的方法,但EV入网剩余时间的平均充电功率可能偏离 P_{av} ,那么以 P_{av} 反映用户的充电需求就有可能出现偏差,且并未研究EV向电网放电的情况;文献[18]设置了一个可参与调频的SOC阈值,当EV的SOC达到该阈值时,则可以通过V2G参与电网调频,但这种控制方式并不

收稿日期:2021-03-26;修回日期:2021-07-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677004)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677004)

能反映用户的需求程度与调频功率之间的关系。

合理的EV调频策略需要兼顾电网与用户二者的需求,为此本文采用电网友好型的VSM技术来控制EV参与调频,并在文献[17]的基础上进行改进,提出一种更合理的反映用户需求程度的参数,设计T-S模糊控制器控制EV通过充放电参与调频辅助服务,可以在充电时间结束时达到用户期望SOC。首先,基于VSG技术建立了EV充放电模型;然后,将所提参数应用到EV的一、二次调频过程中,并设计了输出精度更高的T-S型模糊控制器来参与二次调频,由于输出为输入的线性函数,T-S型模糊控制器可以根据调频参与度因子的大小更精确地控制EV充放电;最后,通过仿真对比验证了所提控制策略的有效性和优越性。

1 EV充放电模型架构

1.1 基于VSG的EV模型

本文研究的EV充放电模型如图1所示,其由VSG模块、双向DC/DC变流器模块、调频参与度因子计算模块、一次调频模块以及二次调频模块构成。其中,VSG模块具有变流、补偿阻尼的功能;双向DC/DC变流器模块用于稳定直流母线电压;调频参与度因子计算模块综合用户期望充电时间 T_{pl} 、期望SOC $S_{SOC,e}$ 以及当前SOC $S_{SOC,1}$ 计算得到反映用户充电需求程度的调频参与度因子 α ,将其与电网频率偏差 Δf 输入一、二次调频模块,分别得到一次调频功率 P_1 和二次调频功率 P_2 ,最终相加得到VSG的有功参考功率 P_{set} ,用于控制EV智能充放电。

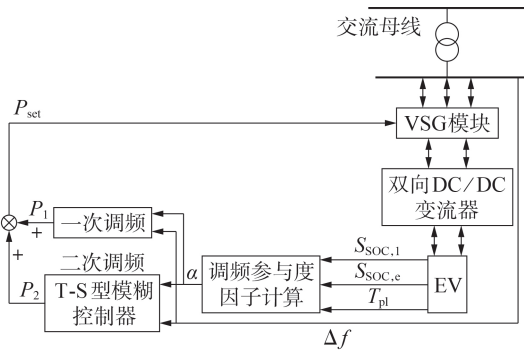


图1 EV充放电模型

Fig.1 Charging and discharging model of EV

1.2 VSG的电路及控制结构

VSG的电路拓扑结构如图2所示。EV动力电池通过前级双向DC/DC变流器与后级DC/AC变换器进行充放电。其中,双向DC/DC变流器采用电压电流双环控制来稳定直流侧电压;DC/AC变换器采用VSG控制策略,根据辅助调频模块输出的功率控制EV进行智能充放电。图2中, V_n 为直流侧电压; V_{ga} 、 V_{gb} 、 V_{gc} 为电网侧三相电压; e_a 、 e_b 、 e_c 为VSG

输出电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为VSG输出电流; R_g 、 L_g 分别为电网侧电阻、电感; R_s 、 C 、 L_s 分别为直流侧电阻、电容、电感,这三者共同构成滤波器,用于滤除变流器输出的谐波电流; V_a 、 V_b 、 V_c 为电容电压降; U_{dc}^* 为直流母线参考电压,即双向DC/DC变流器的电压外环参考信号; ω 为VSG转子的实际角频率; f 为电网频率。

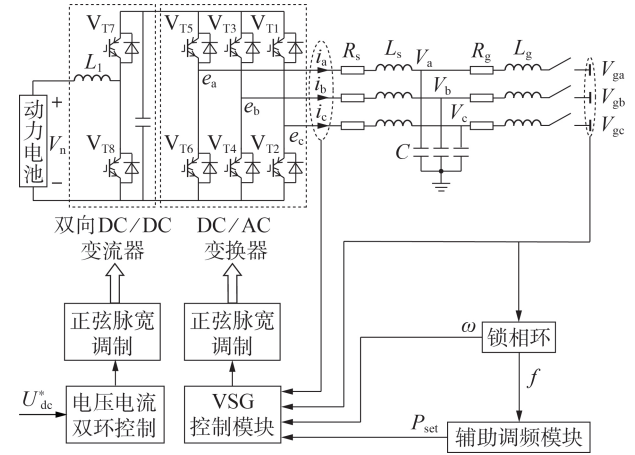


图2 VSG的电路拓扑结构

Fig.2 Topological structure of VSG circuit

目前,关于VSG的建模已有诸多研究,且对于机电部分的建模较为统一。本文采用文献[7]中可同时反映VSG的机电与电磁暂态特性的同步机模型,可增强虚拟定子与转子之间的联系,更接近VSG的特性。VSG的运动方程可表示为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e + K_d (\omega_n - \omega) \quad (1)$$

式中: T_e 、 T_m 分别为电机的电磁转矩、机械转矩; J 为VSG的转动惯量; K_d 为转子的阻尼系数; ω_n 为转子的参考角频率。

电磁转矩 T_e 的计算式为:

$$T_e = M_r i_f \langle \mathbf{i}, \boldsymbol{\varphi}(\sin \theta) \rangle \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\varphi}(\sin \theta) = \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - 2\pi/3) \\ \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: M_r 为电机定子与转子之间的互感; i_f 为定子的励磁电流; $\mathbf{i}$ 为VSG输出的三相电流向量; θ 为转子磁场与a相定子绕组之间的角度; $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示向量的点乘运算。

VSG输出电压 e 和VSG输出的无功功率 Q 分别为:

$$\mathbf{e} = [e_a, e_b, e_c]^T = M_r i_f \boldsymbol{\omega} \boldsymbol{\varphi}(\sin \theta) \quad (4)$$

$$Q = -M_r i_f \langle \mathbf{i}, \boldsymbol{\varphi}(\cos \theta) \rangle \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\varphi}(\cos \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (6)$$

在图2所示结构图中,将滤波器的 L_s 、 R_s 分别等效为VSG定子绕组的电感、电阻,将VSG输出电压 e_a 、 e_b 、 e_c 等效为电机电动势,将电容电压降 V_a 、 V_b 、 V_c 等效为发电机定子电压,将VSG输出电流 i_a 、 i_b 、 i_c 等效为定子电流,则可以将图2所示电路的交流侧在数学上等效为1台VSG,这样EV入网时就具备发电机的惯性、阻尼特性以及电压/频率下垂特性,其控制结构如图3所示。图中, Q_{set} 为设定的无功参考功率,一般设置为0; D_p 为频率环的下垂系数; D_q 为电压环的下垂系数; V_m 、 V_r 分别为电网电压有效值及其参考值; K 为积分系数。

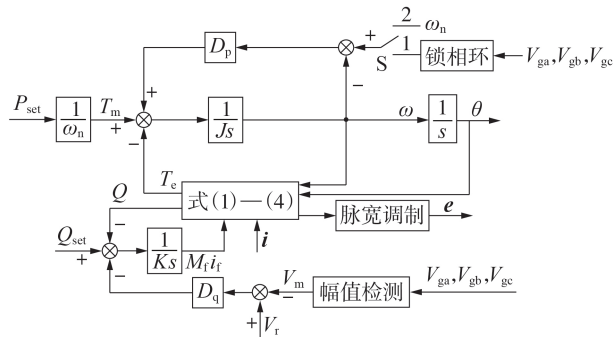


图3 VSG的控制结构

Fig.3 Control structure of VSG

根据开关S位置的不同,VSG有2种工作模式:
①当开关S位于2时,VSG工作在下垂控制模式,具有频率/电压下垂特性;②当开关S位于1时,VSG工作在PQ控制模式,输出给定的有功参考值。在本文研究中,使VSG的有功/频率环工作在下垂控制模式,可根据电网频率波动实现一次调频。无功/电压环同样工作在下垂控制模式,可实现无功/电压的调节。

2 EV辅助调频控制策略

2.1 调频参与度因子 α

EV参与电网辅助调频时需要考虑用户的充电需求。而反映用户充电需求的参数主要有用户期望充电时间 T_{pl} 和在规定时间内期望达到的SOC值2个。本文设计了一种更加合理的、可以反映用户充电需求的参数——调频参与度因子 α ,设计原则如下:检测并计算EV在剩余入网时间内能否以额定功率充电达到用户的期望SOC,如果以额定功率充电达到期望SOC的时间小于剩余入网时间,则表示可以满足用户的充电需求,EV处于可以参与V2G调频的“可控状态”;如果以额定功率充电达到期望SOC的时间大于或等于剩余入网时间,则表明不能满足用户的充电需求,EV处于只能单向充电的“充电状态”。这样就可以在入网时间等于用户设定的时间时,保证达到期望SOC。定义反映用户需求程度的

调频参与度因子 α 的计算式为:

$$\alpha = \frac{T_{pl}}{t_1 + t_2} - 1 \quad (7)$$

式中: t_1 为EV已接入电网的时间; t_2 为EV从当前SOC以额定功率充电至用户期望SOC所需的时间。

若每辆EV以额定功率充电,那么EV从当前SOC $S_{SOC,1}$ 充电至期望SOC $S_{SOC,e}$ 的SOC变化量 ΔS_{SOC} 为:

$$\Delta S_{SOC} = P_N^i t_2 / Q_N \quad (8)$$

式中: P_N^i 为EV i 的额定充电功率; Q_N 为EV电池的额定容量。

可得EV从当前SOC以额定功率充电至用户期望SOC所需的时间 t_2 为:

$$t_2 = Q_N (S_{SOC,e} - S_{SOC,1}) / P_N^i \quad (9)$$

本文设置 α 的临界值为0,若 $\alpha < 0$,则表明EV在剩余入网时间内不足以充电至期望SOC,此时EV工作在额定功率充电模式,不参与电网调频;若 $\alpha = 0$,即 $T_{pl} = t_1 + t_2$,则EV停止参与电网调频,并以额定功率充电,这样能保证EV在剩余入网时间内刚好充电至期望SOC,以满足用户的充电需求;若 $\alpha > 0$,则表明EV的剩余入网时间充足,可以参与电网调频,且 α 越大,调频能力越强。用户可根据自身的计划充电时间与 $S_{SOC,e}$ 设置 α 的取值,当用户设定的 $\alpha < 0$ 时,表示用户不希望EV参与调频,EV工作在额定功率充电模式下。而对于可参与调频的EV而言,考虑到充电桩的占用问题以及实际的充电情况,本文将 α 的取值限制在 $[0, 1]$ 范围内,这样当 α 取值趋近于0时,可以控制EV的充放电功率随 α 取值的减小衰减至0,从而避免过充与过放。

2.2 EV参与一次调频的控制策略

采用下垂控制实现EV参与一次调频,规定功率流动的正方向为由电池流向交流侧电网,且为了减少电池的充放电次数,防止EV频繁充放电,设置了一次频率死区 f_{death} 。EV参与一次调频的下垂特性曲线见附录A图A1。设电网的额定频率为 f_n ,当电网频率偏差 $\Delta f = f - f_n$ 处于 $[-0.05, 0.05]$ Hz范围内时,EV不动作。

在传统的一次调频过程中,功率的变化仅由频率决定且与频率呈负线性关系,忽略了EV固有的交通属性,容易造成EV过充和过放,偏离用户的充电计划。本文进一步考虑EV的移动储能特性,即考虑用户的充电需求特性,当 α 取值较小时,EV应多充电少放电;当 α 取值接近1时,EV应多放电少充电。本文基于调频参与度因子 α ,设最大下垂系数为 K_{max} ,那么设置放电时的下垂系数为 αK_{max} ,充电时的下垂系数为 $(1 - \alpha) K_{max}$,这样就可以根据 α 的取值大小自适应调整下垂系数。自适应下垂系数的变化曲线如图4所示。

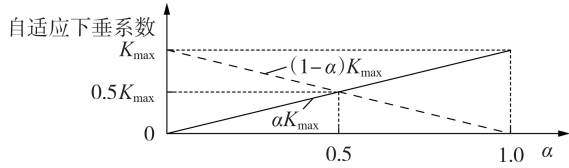


图4 自适应下垂系数的变化曲线

Fig.4 Change curve of adaptive droop coefficient

则EV参与一次调频的功率 P_1 可以表示为:

$$P_1 = \begin{cases} -\alpha K_{\max} \Delta f & \Delta f \leq 0 \\ -(1-\alpha) K_{\max} \Delta f & \Delta f > 0 \end{cases} \quad (10)$$

当 $\alpha > 0$ 时, EV参与电网调频。若电网频率不高于额定频率, EV将向电网输出功率, 此时 α 会缓慢降低并逐渐趋近于0, 则放电功率会随着 α 的减小衰减到0, 避免了过放; 若电网频率高于额定频率, EV将从电网吸收剩余功率, 此时 α 会缓慢增加并逐渐趋近于1, 则充电功率会逐渐减小为0, 避免了过充。当 $\alpha < 0$ 时, EV不参与电网调频, 工作在额定功率充电模式。

EV参与一次调频的控制策略框图见附录A图A2。为了防止EV在 $\Delta f = 0.05$ Hz处频繁充放电, 加入了滞环控制, 用于提高系统稳定性。功率限制模块用于限制EV的最大充放电功率。

2.3 EV参与二次调频的控制策略

当电网频率波动过大且仅靠一次调频作用不能使频率偏差保持在允许范围内时, 就需要增大或减小EV的充放电功率以参与电网的二次调频, 本文设置二次调频的动作阈值为 $|\Delta f| \geq 0.1$ Hz。

EV参与二次调频的充放电功率与用户的充电需求、电网频率之间存在复杂的非线性关系, 无法用固定的数学模型进行描述。而模糊控制可以将人为经验转化为相应的控制策略, 对难以建立模型的系统实现有效的控制。文献[17]设计了Mamdani型模糊控制器, 用于控制EV充放电, 但Mamdani型模糊控制器的输出结果不连续, 且存在模糊误差。本文采用控制精度更高的T-S型模糊控制器, 其输出为输入变量的线性函数, 无需再进行去模糊化, 大幅提高了控制精度, 且可由模糊控制器的输出直接得到EV的充放电功率, 无需设计参考功率。

本文所采用的T-S型模糊控制器的一个输入量为 Δf , 用于反映电网的频率波动; 另一个输入量为 α , 用于反映用户的充电需求。由于T-S型模糊控制器的输出为输入函数的线性函数, 当 α 取值接近于0时可以控制放电功率减小至0, 保证电池不会过放, 在满足用户需求的前提下, 参与电网的辅助调频服务。

输入量 Δf 与 α 均采用运算简单且效率高的三角形隶属度函数 $\mu(x)$ 来定义模糊变量的语言值^[16]。

1) 电网频率偏差 Δf 的模糊化。

考虑到3000 MW以下系统允许的电网频率偏差范围为 ± 0.5 Hz, 本文将电网频率偏差的模糊语言变量 $\Delta \tilde{f}$ 论域定义在闭区间 $[-0.5, 0.5]$ 内, 量化因子取值为1, 其论域内有5个模糊语言变量{NB, NS, Z, PB, PS}, 分别表示电网频率偏离额定频率的程度为负大、负小、零、正小、正大。 Δf 的隶属度函数见附录A图A3。

2) 调频参与度因子 α 的模糊化。

将调频参与度因子的模糊语言变量 $\tilde{\alpha}$ 论域定义在区间 $[0, 1]$ 内, 量化因子取值为1, 其论域内有5个模糊语言变量{Z, S, M, L, VL}, 分别表示 α 偏离1的程度为零、小、中等、大、极大。 α 的隶属度函数见附录A图A4。

本文所采用的模糊控制规则如式(11)所示。

$$\begin{cases} R_a^i: \text{if } x_1 \in A_1^i \text{ and } x_2 \in A_2^i \\ \text{then } P_2^i = f^i(x_1, x_2) = a^i x_1 + b^i x_2 + c \end{cases} \quad (11)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

式中: R_a^i 为第 i 条模糊控制规则; x_1, x_2 分别为模糊控制器的第一个、第二个输入; A_1^i, A_2^i 分别为 x_1, x_2 的模糊集合; P_2^i 为模糊控制器根据第 i 条模糊控制规则输出的二次调频功率; $f^i(x_1, x_2)$ 为第 i 条模糊控制规则对应的模糊系统的输出函数; a^i, b^i 分别为第 i 条模糊控制规则的第一个、第二个输入的系数; c 为常数; n 为模糊控制规则数量。

在本文的研究中, 取 $x_1 = \Delta f, x_2 = \alpha, A_1^i \in \Delta \tilde{f}, A_2^i \in \tilde{\alpha}$, 为了简化模糊控制规则的设计, 将 Δf 的系数 a^i 置0, 则式(11)可以简化为:

$$P_2^i = f^i(x_1, x_2) = b^i \alpha + c \quad (12)$$

模糊控制规则的设计依据如下: EV的二次调频功率由电网频率偏差 Δf 与调频参与度因子 α 共同决定。当系统负荷增多导致 $\Delta f < 0$ 时, 若用户的充电需求小, 即 α 取值接近于1, 控制EV向电网放电, 且 α 取值越大, 放电功率越大; 若 α 取值接近于0, 虽然此时电网频率低于额定值, 但由于用户的充电需求很高, 因此设置EV工作在不放电或者以小功率充电的模式, 设计二次调频功率 P_2^i 主要由 $b^i \alpha$ 决定, 这样可以控制EV放电功率随 α 取值的减小而减小至0; 而当系统负荷减少导致 $\Delta f > 0$ 时, EV全部工作在充电模式, 用户的充电需求越高, 则EV充电功率越大, 因此设计充电功率随着 α 取值的减小而增大, 此时设计二次调频功率 P_2^i 主要由 c 决定, c 会随着不同的情况变化, 这样可实现充放电功率的精细控制。

根据上述分析, 设计充放电模糊控制规则如表1所示。表中, $K_i = 1000 i (i = 1, 2, \dots, 6)$, 单位为W, 正值表示放电, 负值表示充电。

EV参与二次调频的控制框图见附录A图A5。监测器实时采集EV的当前SOC, 并综合用户设置的

表1 充放电模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rules for charging and discharging power

α 的模糊语言	b'					c				
	NB	NS	Z	PB	PS	NB	NS	Z	PB	PS
Z	0	0	0	0	0	$-K_1$	$-K_1$	$-K_5$	$-K_6$	$-K_5$
S	K_4	K_2	0	0	0	0	0	$-K_5$	$-K_6$	$-K_5$
M	K_4	K_2	0	0	0	0	0	$-K_4$	$-K_6$	$-K_5$
L	K_4	K_2	0	0	0	0	0	$-K_4$	$-K_5$	$-K_4$
VL	0	0	0	0	0	K_5	K_4	$-K_3$	$-K_4$	$-K_3$

注:表头中的NB、NS、Z、PB、PS为 Δf 的模糊语言。

期望SOC、期望充电时长 T_{pl} 计算调频参与度因子 α ,模糊控制模块根据计算所得 α 的值以及当前电网频率偏差输出二次调频功率,最后采用功率限制模块设置的功率限值 P_{limit} 对输出功率进行限制。

3 仿真分析

本文选取某单区域系统为例进行仿真分析,其额定发电功率为300 MW,额定频率为50 Hz,EV动力电池采用应用广泛的磷酸铁锂电池,额定充放电功率为8 kW。在MATLAB R2017a/Simulink环境下搭建仿真模型,并对所提控制策略进行仿真验证。为了实现对模型进行较长时间的仿真研究,逆变器采用平均值等效模型,允许使用较大的仿真步长。VSG仿真参数见附录B表B1。

3.1 转动惯量和阻尼系数验证

VSG技术在EV参与调频时可以为电网提供惯性和阻尼支持,对此进行仿真验证:EV在初始时刻以3 kW功率放电,在 $t=4$ s时放电功率变为8 kW,不同转动惯量 J 和阻尼系数 K_d 下VSG的响应功率曲线见附录B图B1。由图B1(a)可以看出:当 $J=0.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 时,VSG响应功率的变化速度最快,响应时间约为0.05 s,且超调量为0;而当 $J=0.25 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 时,VSG响应功率的变化速度变缓,响应时间约为0.1 s,且出现超调量;当 $J=0.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 时,VSG响应功率的变化速度最慢,响应时间约为0.3 s,且超调量最大。可见,转动惯量 J 可以延缓功率的响应速度,从而降低频率的变化速度。由图B1(b)可以看出:当 $K_d=6$ 时,VSG响应功率的振荡幅值最大,且动态响应时间最长,呈现欠阻尼状态;当 $K_d=12$ 时,响应功率的振荡幅值变小且响应时间缩短;而当 $K_d=18$ 时,VSG可以由变化之前的稳定值平滑地过渡到新的稳定值,且响应时间缩短,呈现过阻尼状态。可见,阻尼系数 K_d 可以抑制功率响应的振荡,且 K_d 值越大,动态响应功率振荡幅值的衰减速度越快。

3.2 充放电控制策略的有效性验证

本节对所提EV参与调频的控制策略进行仿真验证。首先,根据用户的充电需求即 α 的取值对EV进行分类,设计4辆不同状态的EV代表4种不同类

型的用户:EV₁—EV₄分别代表充电需求低、中等、大、极大的用户。然后,考虑电网频率接近额定频率、电网频率偏高、电网频率偏低这3种电网运行工况。最后,为了测试EV充放电控制策略,设置如下时序进行仿真测试:[0,2] s电网频率为50 Hz(运行工况1),(2,8] s频率发生幅值为0.3 Hz的正弦波动(运行工况2),(8,14] s频率发生幅值为-0.3 Hz的正弦波动(运行工况3)。EV的仿真参数见附录B表B2。仿真结果见附录B图B2。

1) 运行工况1。

由图B2可以看出,[0,2] s内电网频率等于额定频率,负荷需求与发电机出力平衡,一、二次调频模块均不动作,由于EV₄的 $\alpha<0$,其在任何情况下都以额定功率充电,SOC匀速上升,而EV₁—EV₃的充放电功率为0,SOC保持不变。此外,除了EV₄的 α 有所上升外,EV₁—EV₃的 α 都有不同幅度的下降,这是因为虽然EV₁—EV₃的充放电功率为0,但其入网时间越来越短,从而导致 α 呈逐渐减小的趋势。

2) 运行工况2。

(2,8] s内,电网中的有功功率过剩,电网频率高于额定频率,一、二次调频模块在满足动作阈值时动作,EV₁—EV₄均工作在充电模式,SOC有不同程度的升高。其中,EV₁的 α 最大,表明其入网时间可以充分满足用户的需求,因此其充电功率最小;EV₂的 α 接近于0.5,同样呈减小的趋势,表明用户的充电需求程度为中等,且其充电功率大于EV₁;EV₃的 α 接近于0并不再减小,表明在其入网时间内以额定功率充电刚好能充至用户的期望SOC,因此其充电功率接近额定充电功率;EV₄的 $\alpha<0$,故其以额定功率充电。

3) 运行工况3。

(8,14] s内,电网处于负荷高峰时段,电网频率低于额定频率,一、二次调频模块在满足动作阈值时动作。此时, α 值越大的EV,其放电功率越大。其中,EV₁当前的 α 值最大,因此其放电功率最大,SOC下降最快;EV₂的 α 值小于EV₁的 α 值,故其放电功率也小于EV₁的放电功率,SOC下降速率小于EV₁;EV₃的 α 值接近于0,因此其工作在小功率放电或者不放电模式,SOC几乎保持不变;而EV₄仍然以额定功率充电,SOC缓慢升高。此外,与运行工况1类似,除了EV₄的 α 有所上升外,EV₁—EV₃的 α 均有不同幅度的下降。

由上述结果可知,本文所提控制策略可以根据电网频率波动、调频参与度因子的大小智能控制EV充放电,既考虑了用户的充电需求,又能为电网提供辅助调频服务。

3.3 模糊控制策略的效果验证

为了说明本文所提控制策略(下文简称本文策

略)的优越性,在相同的仿真条件下将其与文献[17]中的控制策略(下文简称策略1)进行对比,并选择电网频率偏高的运行工况进行模拟,从而体现控制策略在应对极端情况时的能力。仿真条件设置如下:策略1的充电因子在0~2范围内变化,本文策略的调频参与度因子在0~1范围内变化,分别观察2种控制策略在频率偏差为 ± 0.4 Hz时的功率响应特性。仿真结果见附录B图B3。由图B3(a)可知,当频率偏差为0.4 Hz时,应控制EV充电。当策略1的充电因子在0~1范围内变化时,EV先充电,然后充电功率逐渐减小为0,但充电功率变化不平滑,这是因为Mamdani型模糊控制器的输出结果不连续,存在控制偏差;而本文策略的模糊输出是连续的,不存在控制偏差,因此其输出随调频参与度因子的增大而逐渐减小至稳定值,功率变化平滑。由图B3(b)可知,当频率偏差为-0.4 Hz时,控制充电需求程度不高的EV放电,同时控制充电需求程度高的EV工作在不放电或以小功率充电的模式。当策略1的充电因子在0~1范围内变化时,模糊控制输出为0;而当充电因子大于1时,EV开始放电,放电功率随充电因子的增大而增大,但放电功率变化不平滑。当本文策略的调频参与度因子接近于0时,对用户充电需求程度高的EV以小功率充电,随着参与度因子的增大,EV放电功率线性增大,大幅提高了控制的精度,且功率变化平滑。

3.4 多辆EV的调频作用验证

以附录B图B4所示的典型单区域电力系统调频模型为例,分析采用智能充放电控制策略接入电网的EV对系统频率的影响。其中火电机组为系统的调频机组,原动机为非再热式汽轮机。

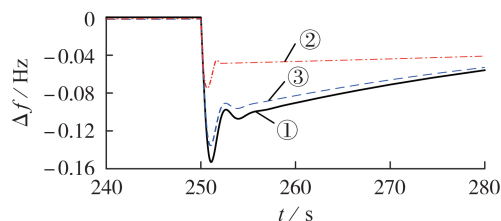
由于本文采用的是VSG模型,在建立等效模型的过程中EV调频模型需要反映VSG的功率响应特性,本文采用EV二阶惯性响应函数,如式(13)所示^[17]。

$$G(s) = \frac{1}{T_{EV} J_{vr} s^2 + J_{vr} s + D_{vr}} \quad (13)$$

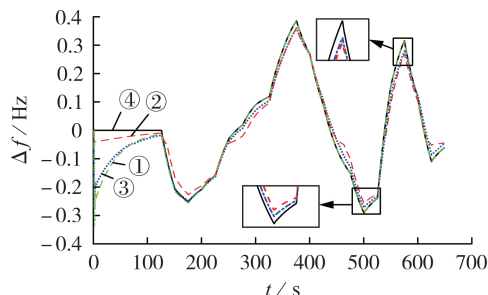
式中: T_{EV} 为VSG的固有时间常数; J_{vr} 、 D_{vr} 分别为VSG的等效虚拟惯量、等效虚拟阻尼。

EV参与调频的模型如附录B图B5所示。仿真仍选取上述4种具有代表性的EV,具体参数见附录B表B3。基于本文所提EV辅助调频模型,首先在阶跃负荷扰动下对策略1和本文策略的调频效果进行仿真对比,设置在 $t=250$ s时发生15 MW的负荷突变,观察2种控制策略下的系统频率响应,结果见图5(a);然后在随机负荷扰动下对策略1和本文策略的调频效果进行仿真对比,结果见图5(b)。

由图5(a)可以看出,当负荷突变增大时,相比策略1,采用本文策略时的系统频率偏差更小,因此本



(a) 阶跃负荷扰动



(b) 随机负荷扰动

① EV 不参与调频, ② EV 基于本文策略参与调频
③ EV 基于策略1参与调频, ④ 无EV接入电网

图5 多辆EV的调频效果

Fig.5 Frequency regulation effect of multiple EVs

文策略的调频效果更好。这是因为当频率偏差小于0时,本文策略可以控制EV向电网放电,而策略1只是减小了充电功率,EV仍处于充电过程,相当于负荷。可见,在发生负荷突变增大时,采用本文策略的效果更好。由图5(b)可以看出,在 $[0, 125]$ s内,如果无EV接入电网,则电网频率偏差为0;当大量EV在 $t=0$ s时接入电网但不参与调频时,相当于系统接入了大量负荷,电网频率会发生较大程度的跌落;而当EV在 $t=0$ s时接入电网并参与调频时,相较于采用策略1,采用本文策略时的频率跌落明显更小。在电网负荷低谷($t=375$ s和 $t=575$ s)时,策略1与本文策略的调频效果相近,采用本文策略时的频率偏差稍小于采用策略1时的频率偏差。而在电网负荷高峰($t=175$ s和 $t=500$ s)时,由于采用本文策略的EV可以向电网放电,补偿电网的功率缺额,而采用策略1的EV只是减小充电功率,因此采用本文策略时的频率偏差明显小于采用策略1时的频率偏差。随着时间的推移,EV接入但不参与调频的频率偏差变化曲线与无EV接入时的频率偏差变化曲线逐渐重合,这表明由于系统自身的频率调节作用,原动机逐渐发出接入电网EV所需的充电功率,EV恒功率充电不再对电网的频率产生影响。

多辆EV参与调频的仿真结果见附录B图B6。由图可见:在电网高峰负荷时段,电网频率低于额定频率, EV_1 、 EV_2 的 α 较大,可以参与电网的二次调频,因此电网负荷高峰时段该2种类型的EV按照 α 值的大小向电网输出功率, α 值越大,则输出的功率越大,SOC随之降低;而 EV_3 、 EV_4 的 α 很小,故这2种类

型的EV均以额定功率充电, SOC随之升高。在电网负荷低谷时段, 电网频率高于额定频率, 需要EV充电来储存电网中的剩余有功功率, α 越小的EV, 其充电功率越大, 因此EV₄的充电功率最大, EV₁的充电功率最小, SOC均有不同程度的升高。

由上述仿真结果可以看出, 采用本文策略的多辆EV接入频率波动的电网时, 可以在满足用户充电需求的同时参与电网的辅助调频服务, 减小了电网频率波动, 有效地实现了“削峰填谷”。仿真进一步对本文策略与文献[17]所提控制策略进行了对比分析, 仿真结果表明本文所提控制策略在发生阶跃负荷扰动以及随机负荷扰动时都能更加有效地减小频率偏差, 提高电力系统的稳定性。

4 结论

随着接入电网的EV日益增多, 其入网时带来的惯量、阻尼缺失问题日益严重, 同时考虑到EV可以充分发挥其移动储能特性为电网提供调频服务, 本文基于VSG技术以及模糊控制技术, 提出了考虑用户充电需求的EV智能充放电控制策略, 并进行了仿真验证, 所得结论如下。

1) 本文所提控制策略基于由两级构成的EV充放电机电, 其中直流侧接口采用双向半桥DC/DC变流器, 用于维持直流母线电压稳定; 交流侧DC/AC变换器采用VSG技术, 引入同步发电机的惯量、阻尼特性, 用于补偿EV大量入网造成的惯量、阻尼缺失的问题, 并可提供频率调节以及电压补偿服务。

2) 关于EV参与电网一次调频, 提出了调频参与度因子 α , 根据频率偏差以及用户充电需求确定一次调频系数, 实现下垂系数的自适应调整, 避免了EV的过充与过放。

3) 关于EV参与电网二次调频, 设计了T-S型模糊控制器, 其可以根据用户的充电需求程度、电网频率实现EV的智能充放电。

本文在考虑用户充电需求的基础上控制EV参与电网调频, 减小了频率波动, 提高了电力系统的稳定性, 为EV参与调频提供了一种新方案及新思路。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 梅哲, 詹红霞, 杨孝华, 等. 考虑电流保护的配电网电动汽车与分布式能源配合优化运行策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 89-102, 181.
MEI Zhe, ZHAN Hongxia, YANG Xiaohua, et al. Optimal operating strategy of distribution network based on coordination of electric vehicle and distributed energy resource considering current protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 89-102, 181.
- [2] 新华社. 国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要[EB/OL]. (2011-03-16)[2020-11-03]. <http://www.gov.cn/2011lh/>
content_1825838.htm.
- [3] VARAJÃO D, ARAÚJO R E, MIRANDA L M, et al. Control of an isolated single-phase bidirectional AC-DC matrix converter for V2G applications[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 149: 19-29.
- [4] 李怡然, 张妹, 肖先勇, 等. V2G模式下计及供需两侧需求的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 129-135, 143.
LI Yiran, ZHANG Shu, XIAO Xianrong, et al. Charging and discharging scheduling strategy of EVs considering demands of supply side and demand side under V2G mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 129-135, 143.
- [5] 魏靖. 电动汽车参与电网调频的控制方法[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
WEI Jing. The control method of electric vehicles participating in frequency regulation of power systems[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [6] TAN J, WANG L F. A game-theoretic framework for vehicle-to-grid frequency regulation considering smart charging mechanism[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2358-2369.
- [7] ZHONG Q C, NGUYEN P L, MA Z Y, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [8] 钟庆昌, 托马斯·霍尔尼克. 新能源接入智能电网的逆变控制关键技术[M]. 钟庆昌, 王晓琳, 曹鑫, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016: 260-262.
- [9] 李晓萌, 贾宏杰, 穆云飞, 等. 时滞环境下基于电动汽车与电热泵的协调频率控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 88-95, 110.
LI Xiaomeng, JIA Hongjie, MU Yunfei, et al. Coordinated frequency control based on electric vehicles and heat pumps considering time-delay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 88-95, 110.
- [10] AZIZ M, HUDA M. Utilization of electric vehicles for frequency regulation in Danish electrical grid[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 3020-3025.
- [11] HERNÁNDEZ J C, SANCHEZ-SUTIL F, VIDAL P G, et al. Primary frequency control and dynamic grid support for vehicle-to-grid in transmission systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 100: 152-166.
- [12] 杨健维, 董鸿志, 廖凯, 等. 计及电动汽车辅助调频的负荷频率控制联合优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 200-206.
YANG Jianwei, DONG Hongzhi, LIAO Kai, et al. Joint optimization of load frequency control considering auxiliary frequency regulation of electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 200-206.
- [13] 张美霞, 蔡雅慧, 杨秀, 等. 考虑用户充电差异性的家用电动汽车充电需求分布分析方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 154-163.
ZHANG Meixia, CAI Yahui, YANG Xiu, et al. Charging demand distribution analysis method of household electric vehicles considering users' charging difference[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 154-163.
- [14] 吕志鹏, 梁英, 曾正, 等. 应用虚拟同步电机技术的电动汽车快充控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4287-4294.
LÜ Zhipeng, LIANG Ying, ZENG Zheng, et al. Virtual synchronous motor based control scheme of fast charger for electric vehicle application[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4287-4294.
- [15] 刘其辉, 逮胜建. 参与微电网调频的电动汽车虚拟同步机充放电控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 171-179.
LIU Qihui, LU Shengjian. Charging and discharging control

- strategy based on virtual synchronous machine for electrical vehicles participating in frequency regulation of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 171-179.
- [16] 刘东奇, 钟庆昌, 王耀南, 等. 基于同步逆变器的电动汽车 V2G 智能充放电控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 544-557.
- LIU Dongqi, ZHONG Qingchang, WANG Yaonan, et al. A synchroverter-based V2G smart charging and discharging control strategy for electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 544-557.
- [17] 逯胜建. 基于虚拟同步机的电动汽车充放电控制及辅助调频策略[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- LU Shengjian. Charge/discharge and auxiliary frequency modulation control strategy of electric vehicle based on virtual synchronous machine[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [18] 周林. 电动汽车参与电力系统频率调整研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- ZHOU Lin. Research on frequency regulation of power sys-

tem with electric vehicles[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.

作者简介:



苏 粟

苏 粟(1981—),女,北京人,副教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电动汽车与电网互动、主动配电网的可靠性分析(E-mail:ssu@bjtu.edu.cn);

李家浩(1996—),男,山东日照人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为电动汽车入网控制(E-mail:18121456@bjtu.edu.cn);

李泽宁(1994—),男,山东东营人,博士研究生,主要研究方向为集成智能楼宇的主动配电网系统建模与能量管理、分布式能源系统与产消者供需互动机理、集群电动汽车能量管理(E-mail:zeningli@aliyun.com)。

(编辑 陆丹)

Auxiliary frequency regulation control strategy based on virtual synchronous machine for electric vehicles considering user demand

SU Su¹, LI Jiahao¹, LI Zening¹, WANG Yeting², XIA Dong³, WANG Shidan⁴

(1. National Active Distribution Network Technology Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Grid Xinyuan Holdings Co., Ltd., Beijing 100761, China;

3. Economic and Technical Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 276000, China;

4. Haidian Electric Power Supply Company of State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100000, China)

Abstract: A large number of grid-connected EVs (Electric Vehicles) can provide auxiliary frequency regulation service. Aiming at the problem of lacking inertia and damping caused by V2G (Vehicle-to-Grid), the virtual synchronous machine technology is adopted to make EVs have similar inertial damping characteristics and frequency regulation characteristics to synchronous generator. In order to solve the frequency regulation problem of EVs, an intelligent EV charging and discharging control strategy considering users' charging demand is proposed. Firstly, the frequency regulation participation factor is proposed, and the primary frequency regulation coefficient is adaptively determined according to the expected state-of-charge and the planned charging time of users, and then the primary frequency regulation power is obtained. Then, the T-S fuzzy controller is designed with the full consideration of users' demand, and the secondary frequency regulation power is obtained according to the frequency deviation and frequency regulation participation factor of power grid, so as to realize the intelligent charging and discharging of EVs. Finally, the simulation verification is carried out under different initial state of battery and user demands. Simulative results show that the proposed control strategy can intelligently control the charging and discharging of EVs according to the frequency fluctuation of power grid and the charging demand degree of users, and EVs' participation in the auxiliary frequency regulation service of power grid under the condition of meeting users' charging demand reduces the frequency fluctuation of power grid and improves the stability of power system.

Key words: electric vehicles; virtual synchronous machine; auxiliary frequency regulation; user demand; control strategy; V2G

附录 A

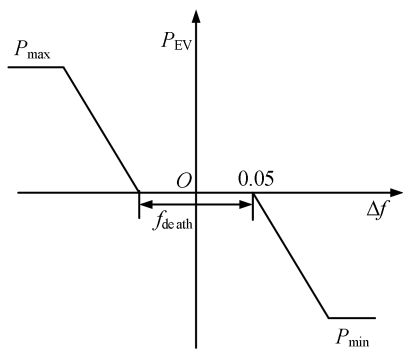


图 A1 EV 参与一次调频的下垂特性曲线
Fig.A1 Droop characteristic curve of EV participating in primary frequency regulation

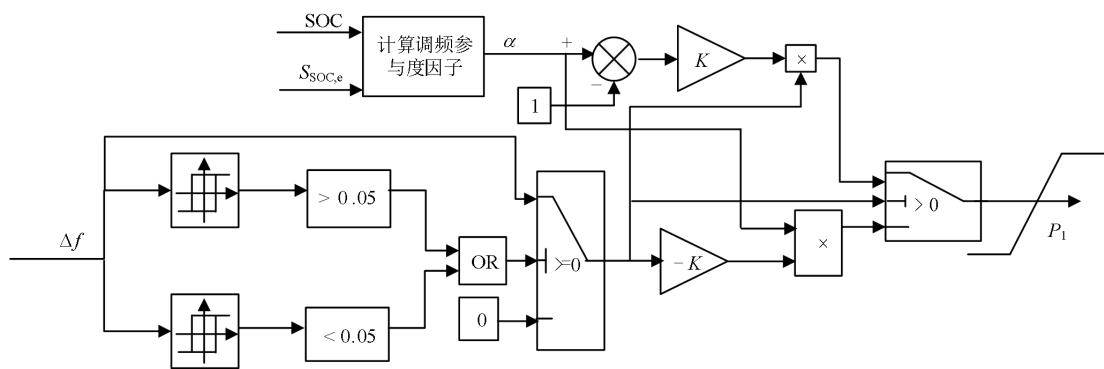


图 A2 EV 参与一次调频的控制策略框图
Fig.A2 Control strategy block diagram of EV participating in primary frequency regulation

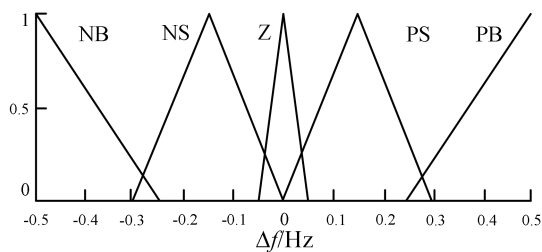


图 A3 频率偏差 Δf 的隶属度函数
Fig.A3 Membership function of frequency deviation Δf

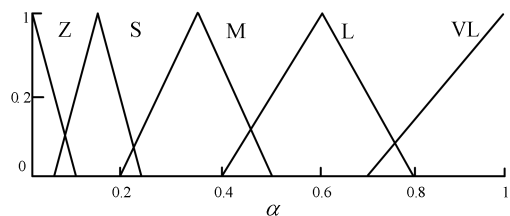


图 A4 调频参与度因子 α 的隶属度函数
Fig.A4 Membership function of frequency regulation participation factor α

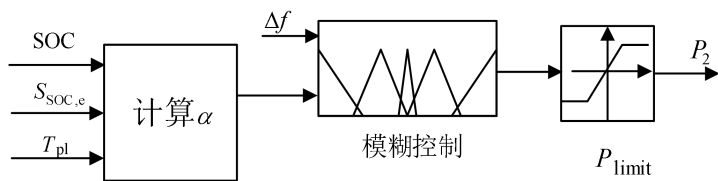
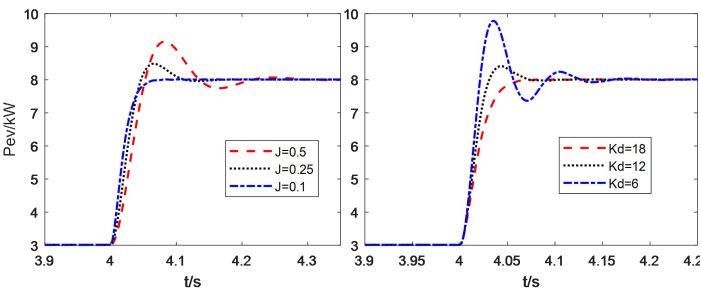


图 A5 EV 参与二次调频的控制框图
Fig.A5 Control block diagram of EV participating in secondary frequency regulation

附录 B

表 B1 VSG 仿真参数
Table B1 Simulation parameters of VSG

参数	取值	参数	取值
R_g / Ω	0.1	f_N / Hz	50
L_g / mH	0.15	V_n / V	300
$C / \mu\text{F}$	50	U_{dc}^* / V	750
R_s / Ω	0.1	D_p	10
L_s / mH	0.15	$D_q / (\text{var} \cdot \text{V}^{-1})$	1113.4
$J / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.5	$K_{\max}$	40000
C_{dc} / mF	45	容量 $Q / (\text{A} \cdot \text{h})$	100
额定线电压/V	$220\sqrt{2}$		



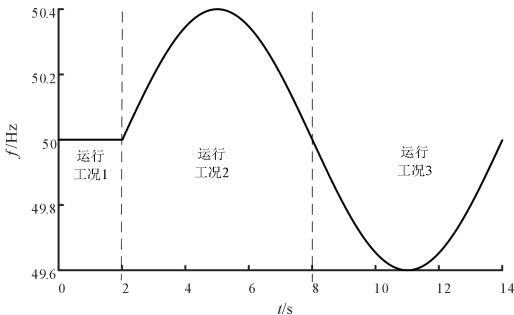
(a) 不同转动惯量 (b) 不同阻尼系数

图 B1 不同转动惯量和阻尼系数下 VSG 的响应功率曲线

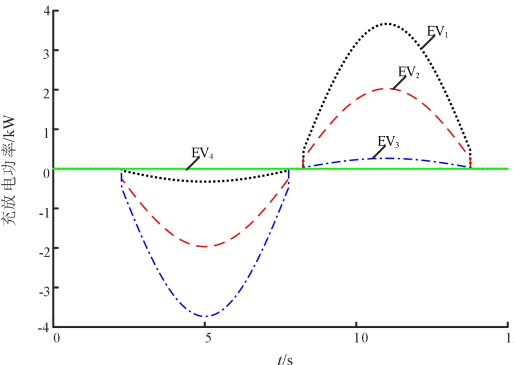
Fig.B1 Response power curves of VSG under different inertia moments and damping coefficients

表 B2 单辆 EV 的仿真参数
Table B2 Simulation parameters of single EV

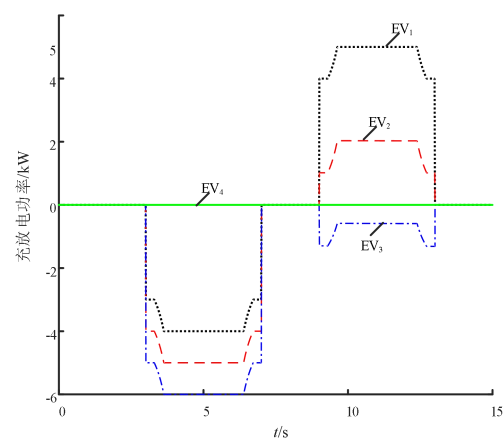
EV	EV 入网时的 SOC/%	$S_{\text{SOC},e}/\%$	T_{pl}/h	a_0
EV ₁	60	85	3	0.920
EV ₂	50	85	3.3	0.508
EV ₃	40	85	3	0.066
EV ₄	30	85	3	-0.127



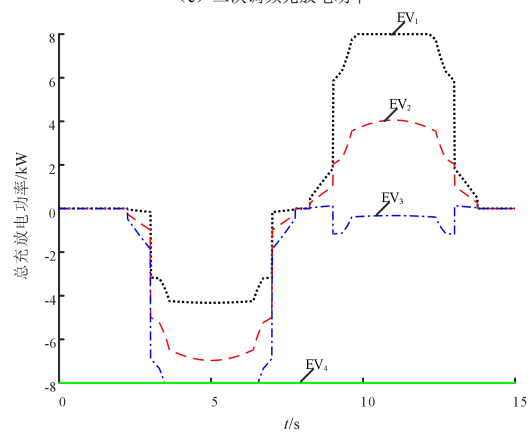
(a) 电网频率



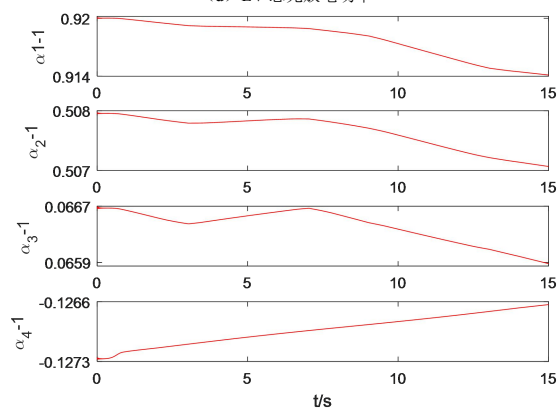
(b) 一次调频充放电功率



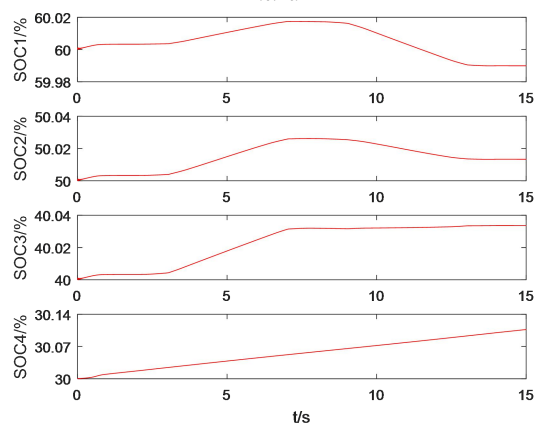
(c) 二次调频充放电功率



(d) EV 总充放电功率



(e) α



(f) SOC

图 B2 充放电控制策略的仿真结果

Fig.B2 Simulative results of charging/discharging control strategy

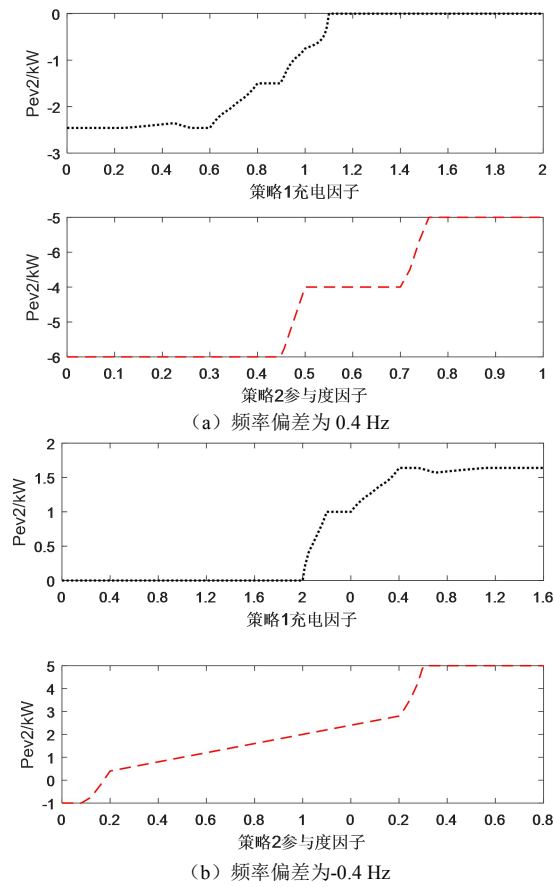


图 B3 模糊控制策略的仿真结果
Fig.B3 Simulative results of fuzzy control strategy

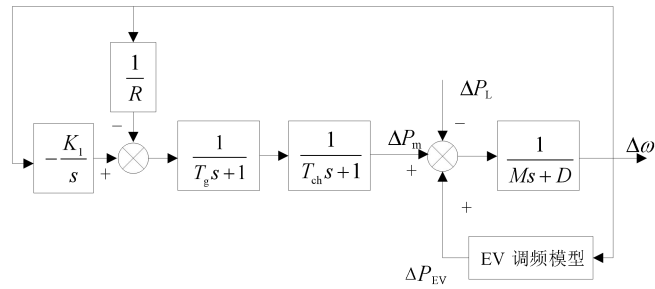


图 B4 含 EV 的单区域 AGC 机组调频模型
Fig.B4 Frequency regulation model of AGC unit in single area with EV

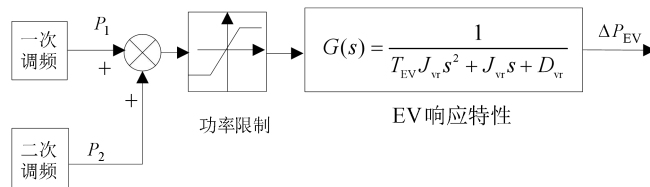
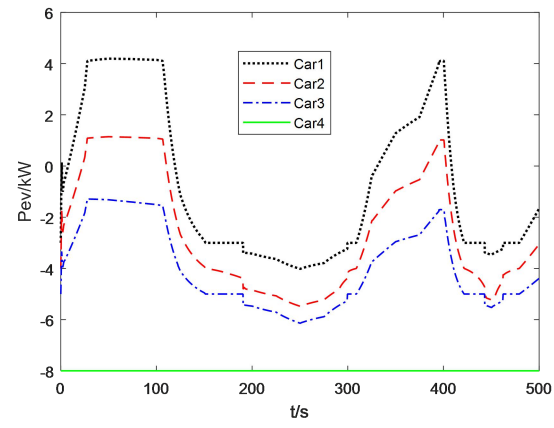
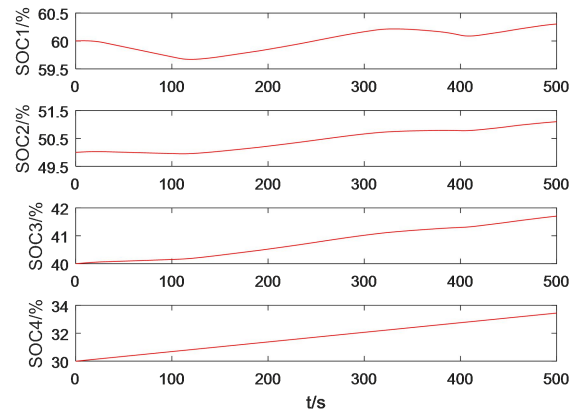


图 B5 EV 参与调频的模型
Fig.B5 Model of EV participating in frequency regulation
表 B3 多辆 EV 的仿真参数
Table B3 Simulation parameters of multiple EVs

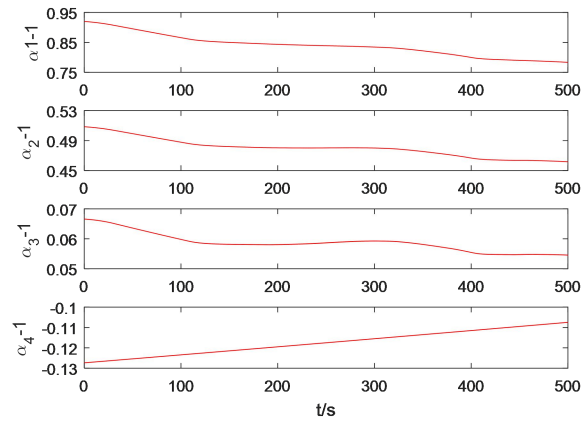
EV	$Q/(A \cdot h)$	$S_{soc,0}/\%$	$S_{soc,e}/\%$	数量/辆
EV ₁	100	60	85	1000
EV ₂	100	50	85	2000
EV ₃	100	40	85	1500
EV ₄	100	30	85	1000



(a) EV 总充放电功率



(b) SOC



(c) α

图 B6 多辆 EV 参与调频的仿真结果

Fig.B6 Simulative results of multiple EVs participating in frequency regulation